

УДК 621.039.5

А. В. ЕФИМОВ, д-р техн. наук, проф.; зав. каф. НТУ «ХПИ»;
М. В. МАКСИМОВ, д-р техн. наук, проф.; зав. каф. ОНПУ, Одесса;
Ю. В. РОМАШОВ, канд. техн. наук, доц.; доц. каф. НТУ «ХПИ»

КРИТИЧЕСКИЕ СЖИМАЮЩИЕ СИЛЫ И ФОРМЫ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ НАПРАВЛЯЮЩИХ КАНАЛОВ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ СБОРОК ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ ВВЭР-1000

Рассмотрена устойчивость деформирования при осевом сжатии трубчатого направляющего канала, соединяющего головку и хвостовик тепловыделяющей сборки ядерного реактора ВВЭР-1000. Исследовано влияние условий закрепления краев направляющего канала на величины критических сжимающих сил и напряжений, а также на форму изгиба при потере устойчивости. Полученные величины критических сжимающих сил и напряжений показывают возможность изгиба направляющих каналов из-за потери устойчивости, причем форма такого изгиба может содержать одну-две точки перегиба, что существенно затруднит движение органов регулирования системы управления и защиты.

Ключевые слова: тепловыделяющая сборка, направляющий канал, устойчивость.

Ведение. Отклонения от прямолинейной формы направляющих каналов тепловыделяющихборок (ТВС) ядерного реактора ВВЭР-1000 могут привести к увеличению времени падения органов регулирования мощностью реактора до низа его активной зоны, что увеличивает риски возникновения тяжелых аварий на АЭС. При эксплуатации ядерных реакторов типа ВВЭР-1000 имели место случаи искривления направляющих каналов ТВС из-за потери устойчивости [1], что делает актуальными исследования устойчивости деформирования этих направляющих каналов.

Анализ основных достижений и литературы. Нормы расчета на прочность [2] элементов ядерных реакторов предусматривают определение критических нагрузок и (или) напряжений, вызывающих потерю устойчивости при осевом сжатии и (или) сжатии наружным давлением. Направляющие каналы ТВС ядерного реактора ВВЭР-1000 представляют собой выполненные из стали 08Х18Н10Т трубы 12,6×0,85 мм длиной около 4000 мм, которые испытывают осевое сжатие в процессе монтажа и эксплуатации [1]. В соответствии с нормами [2] направляющие каналы ТВС при расчете на устойчивость следует рассматривать как сжимаемые в осевом направлении длинные сжатые стержни, закрепления краев которых могут отвечать шарнирам и (или) жестким заделкам. Расчеты, выполненные в соответствии с нормами [2] с учетом температуры конструкционного материала около 350 °С в период эксплуатации, привели к следующим результатам для различных вариантов закреплений краев направляющего канала: при шарнирном закреплении двух краев критическое сжимающее напряжение составляет 1,81 МПа, а отвечающая ему сжимающая сила – соответственно 5,80 кгс; при одном шарнирно и другом жестко закрепленном крае критическое сжимающее напряжение составляет 3,22 МПа, а отвечающая ему сжимающая сила – соответственно 10,30 кгс; при жестком закреплении двух краев критическое сжимающее напряжение составляет 7,25 МПа, а отвечающая ему сжимающая сила – соответственно 23,18 кгс.

Изменения сжимающего напряжения и силы, обусловленные стохастичностью характера изменения параметров при эксплуатации ТВС ядерных реакторов, могут оказаться сопоставимыми с относительно небольшими критическими значениями 1,81...7,25 МПа сжимающего напряжения и значениями 5,8...23,18 кгс сжимающей

© А.В. Ефимов, М.В. Максимов, Ю.В. Ромашов, 2015

силы, что создает возможность изгиба направляющих каналов вследствие потери устойчивости. Определение формы возможного изгиба при потере устойчивости элементов оборудования ядерных энергоустановок в виде длинных сжатых стержней в нормах расчета [2] не предусматривается.

Цель исследования, постановка задачи. Форма изогнутой оси направляющего канала будет влиять на движение по нему органов регулирования (поглощающих элементов) системы управления и защиты ядерного реактора. Целью данного исследования, является определение критических сжимающих напряжений и сил, а также отвечающих им форм потери устойчивости направляющих каналов ТВС ядерных реакторов ВВЭР-1000 на основе известных результатов теории устойчивости деформируемых систем [3, 4].

Устойчивость сжатых стержней. Как известно из [3, 4], критические нагрузки и формы потери устойчивости сжатых стержней определяются с помощью дифференциального уравнения:

$$\frac{d^4 w}{dx^4} + \mu^2 \frac{d^2 w}{dx^2} = 0, \quad \mu^2 = \frac{P}{EJ}, \quad 0 \leq x \leq L, \quad (1)$$

где x – координата вдоль оси стержня; $w = w(x)$ – прогиб стержня; P – сжимающая сила; E – модуль упругости материала стержня и J – момент инерции сечения стержня, характеризующие его изгибную жесткость; L – длина стержня.

Общее решение уравнения (1) записывается следующим образом:

$$w(x) = A_1 \sin(\mu x) + A_2 \cos(\mu x) + A_3 x + A_4, \quad (2)$$

где A_1, A_2, A_3, A_4 – постоянные интегрирования.

Для определения постоянных интегрирования общего решение (2) используют краевые условия, отражающие способы закрепления краев $x=0$ и $x=L$ стержня, которые, как известно из [3, 4], приводят к системе однородных линейных алгебраических уравнений. Условие существования ненулевого решения этой системы в виде равенства нулю определителя матрицы приводит к трансцендентному уравнению относительно неизвестного $\lambda = \mu L$, с бесконечным счетным множеством корней $\lambda_k, k = 1, 2, 3, \dots$, которые с учетом второго равенства позволяют определить:

$$P_k = EJ \left(\frac{\lambda_k}{L} \right)^2, \quad \sigma_k = \frac{P_k}{F}, \quad k = 1, 2, 3, \dots, \quad (3)$$

где P_k и σ_k – критические значения сжимающей силы и напряжения; F – площадь поперечного сечения стержня.

Располагая корнями $\lambda_k, k = 1, 2, 3, \dots$ характеристического уравнения, имеем возможность определять отвечающие этим корням соотношения между входящими в общее решение (2) постоянными интегрирования, которые представляют формы потери устойчивости стержня $w_k = w_k(x), k = 1, 2, 3, \dots$ [3].

Краевые условия, отражающие способы закрепления краев $x=0$ и $x=L$ стержня, примем в общем виде:

$$\begin{aligned} C_1^{(0)} w(0) + C_2^{(0)} \frac{d^3 w}{dx^3}(0) = 0, \quad C_3^{(0)} \frac{dw}{dx}(0) + C_4^{(0)} \frac{d^2 w}{dx^2}(0) = 0, \\ C_1^{(L)} w(L) + C_2^{(L)} \frac{d^3 w}{dx^3}(L) = 0, \quad C_3^{(L)} \frac{dw}{dx}(L) + C_4^{(L)} \frac{d^2 w}{dx^2}(L) = 0, \end{aligned} \quad (4)$$

где $C_1^{(0)}, C_2^{(0)}, C_3^{(0)}, C_4^{(0)}$ и $C_1^{(L)}, C_2^{(L)}, C_3^{(L)}, C_4^{(L)}$ – коэффициенты, характеризующие

условия взаимодействия направляющего канала с головкой и хвостовиком ТВС.

Система уравнений для определения постоянных интегрирования и условие существования ее ненулевого решения в случае краевых условий (4) примут вид:

$$\begin{aligned}
 & -C_2^{(0)}\mu^3 A_1 + C_1^{(0)}A_2 + C_1^{(0)}A_4 = 0, \quad C_3^{(0)}\mu A_1 - C_4^{(0)}\mu^2 A_2 + C_3^{(0)}A_3 = 0, \\
 & [C_1^{(L)} \sin(\mu L) - C_2^{(L)}\mu^3 \cos(\mu L)]A_1 + [C_1^{(L)} \cos(\mu L) - C_2^{(L)}\mu^3 \sin(\mu L)]A_2 + C_1^{(L)}LA_3 + C_1^{(L)}A_4 = 0, \\
 & [C_3^{(L)}\mu \cos(\mu L) - C_4^{(L)}\mu^2 \sin(\mu L)]A_1 - [C_3^{(L)}\mu \sin(\mu L) + C_4^{(L)}\mu^2 \cos(\mu L)]A_2 + C_3^{(L)}A_3 = 0, \quad (5)
 \end{aligned}$$

$$\begin{vmatrix}
 -C_2^{(0)}\mu^3 & C_1^{(0)} & 0 & C_1^{(0)} \\
 C_3^{(0)}\mu & -C_4^{(0)}\mu^2 & C_3^{(0)} & 0 \\
 C_1^{(L)} \sin(\mu L) - C_2^{(L)}\mu^3 \cos(\mu L) & C_1^{(L)} \cos(\mu L) - C_2^{(L)}\mu^3 \sin(\mu L) & C_1^{(L)}L & C_1^{(L)} \\
 C_3^{(L)}\mu \cos(\mu L) - C_4^{(L)}\mu^2 \sin(\mu L) & -C_3^{(L)}\mu \sin(\mu L) - C_4^{(L)}\mu^2 \cos(\mu L) & C_3^{(L)} & 0
 \end{vmatrix} = 0. \quad (6)$$

Задавая коэффициенты в краевых условиях (4), с помощью (5), (6) имеем возможность рассматривать различные частные случаи закрепления краев стержня.

Критические нагрузки и формы потери устойчивости направляющих каналов ТВС. Рассматриваем направляющие каналы ТВС в виде сжатых стержней с двумя шарнирно закрепленными краями, одним шарнирно и другим жестко закрепленными краями, с двумя жестко закрепленными краями, как в нормах расчета на прочность [2], что отвечает частному виду краевых условий (4) соответственно:

$$C_1^{(0)} = 1, C_2^{(0)} = 0, C_3^{(0)} = 0, C_4^{(0)} = 1, \quad C_1^{(L)} = 1, C_2^{(L)} = 0, C_3^{(L)} = 0, C_4^{(L)} = 1, \quad (7)$$

$$C_1^{(0)} = 1, C_2^{(0)} = 0, C_3^{(0)} = 1, C_4^{(0)} = 0, \quad C_1^{(L)} = 1, C_2^{(L)} = 0, C_3^{(L)} = 0, C_4^{(L)} = 1, \quad (8)$$

$$C_1^{(0)} = 1, C_2^{(0)} = 0, C_3^{(0)} = 1, C_4^{(0)} = 0, \quad C_1^{(L)} = 1, C_2^{(L)} = 0, C_3^{(L)} = 1, C_4^{(L)} = 0. \quad (9)$$

Результаты расчетов критических значений сжимающей силы и сжимающего напряжения направляющего канала ТВС, полученные с помощью уравнения (6) и системы уравнений (5) для частных случаев (7)–(9) закреплений краев, представлены в табл. 1, а отвечающие им формы потери устойчивости – на рис. 1. Естественно, что критические сжимающие силы и напряжения (табл. 1) и соответствующие им формы потери устойчивости (рис. 1), полученные на основе расчетной схемы направляющего канала в виде стержней с закреплениями краев, отвечающими частным случаям (7)–(9), следует рассматривать как ориентировочные.

Таблица 1.

Критические значения сжимающей силы и сжимающего напряжения направляющих каналов с различными закреплениями краев

Номер k	Критические значения P_k , кгс (σ_k , МПа) для разных закреплений краев направляющего канала		
	Шарнирные	Шарнирное одного и жесткое другого края	Жесткие
1	5,99 (1,87)	12,25 (3,83)	23,96 (7,49)
2	23,96 (7,49)	36,22 (11,32)	49,01 (15,32)
3	53,91 (16,85)	72,16 (22,56)	95,84 (29,96)
4	95,84 (29,96)	120,08 (37,54)	144,88 (45,30)

Анализ критических нагрузок и форм потери устойчивости направляющих каналов ТВС. Расчеты привели к относительно небольшим критическим значениям сжимающих сил и напряжений (табл. 1) направляющих каналов ТВС с различными закреплениями краев. Установлено, что ограничения движений краев направляющего канала приводят к уменьшению разницы между значениями критических сил (и, естественно, напряжений), отвечающих различным формам потери устойчивости. Эти

обстоятельства свидетельствуют о том, что в процессе эксплуатации сжимающая сила может превысить не только минимальное, отвечающее $k = 1$, критическое значение, но и критические значения, отвечающие $k > 1$, из-за чего форма изогнутого вследствие потери устойчивости направляющего канала может приобрести одну и более точек перегиба (рис. 1). Естественно, что наличие точек перегиба изогнутой оси направляющего канала может существенно затруднить движение по нему органов регулирования системы управления и защиты реактора и привести к тяжелой аварии.

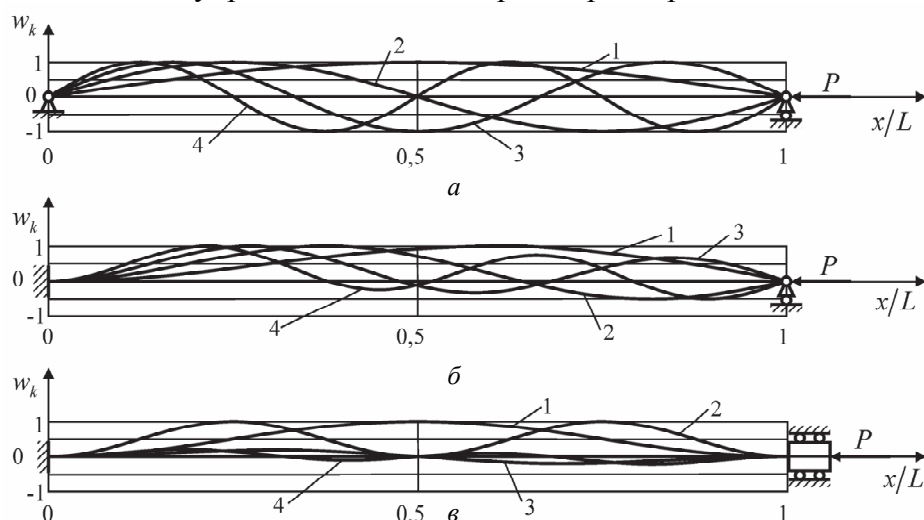


Рис. 1 – Формы потери устойчивости направляющих каналов ТВС ядерного реактора типа ВВЭР-1000: а – шарнирно закрепленных на краях; б – жестко закрепленных на одном и шарнирно закрепленных на другом крае; в – жестко закрепленных на краях; 1 – $k = 1$; 2 – $k = 2$; 3 – $k = 3$; 4 – $k = 4$

Выводы. Из-за незначительной минимальной величины и разности между различными величинами критической сжимающей силы, отвечающей потере устойчивости направляющего канала как длинного сжатого стержня, становится возможным, что в процессе эксплуатации форма изогнутого вследствие потери устойчивости направляющего канала будет содержать несколько точек перегиба. В связи с этим является актуальной разработка расчетных схем, позволяющих определять критические сжимающие силы и осевые напряжения в направляющих каналах с учетом их взаимодействия с головкой, хвостовиком и дистанционирующей решеткой ТВС, что рекомендуется рассмотреть в последующих исследованиях.

Список литературы: 1. Шмелев, В. Д. Активные зоны ВВЭР для атомных электростанций [Текст] / В. Д. Шмелев, Ю. Г. Драгунов, В. П. Денисов, И. Н. Васильченко. – М. : ИКЦ «Академкнига», 2004. – 220 с. 2. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (ПНАЭ Г-7-002-86) [Текст] / Госатомэнергонадзор СССР. – М. : Энергоатомиздат, 1989. – 525 с. 3. Вольмир, А. С. Устойчивость деформируемых систем [Текст] / А. С. Вольмир. – М. : Наука, 1967. – 984 с. 4. Прочность, устойчивость, колебания [Текст] : справочник : в 3-х т. / общ. ред. И. А. Биргер, Я. Г. Пановко. – Т. 3 / В. В. Болотин [и др.]. – М. : Машиностроение, 1968. – 567 с.

Bibliography (transliterated): 1. Shmelev, V. D., et al. *Aktivnyye zony VVJeR dlja atomnyh jelektrostantsij*. Moscow : IKC "Akademkniga", 2004. Print. 2. Gosatomjenergonadzor SSSR. *Normy rascheta na prochnost' oborudovanija i truboprovodov atomnyh jenergeticheskikh ustanovok (PNAJe G-7-002-86)*. Moscow : Jenergoatomizdat, 1989. Print. 3. Vol'mir, A. S. *Ustojchivost' deformiruemyh system*. Moscow : Nauka, 1967. Print. 4. Bolotin, V. V., et al. *Prochnost', ustojchivost', kolebanija*. Ed. I. A. Birger, and Ja. G. Panovko. Vol. 3. Moscow : Mashinostroenie, 1968. Print.

Поступила (received) 13.01.2015